

Auslastungsabhängige Attraktivitäten in makroskopischen Zielwahlmodellen

Christian Schiller

Die stetig wachsenden Anforderungen an Verkehrsnachfragemodellen benötigen entsprechende Modelltheorien. Dem geschuldet wird in dem Artikel ein makroskopischer Modellansatz betrachtet, welcher bei einer zunehmenden Zielauslastung eine entsprechende Abnahme der Zielattraktivität, also eine auslastungsabhängige Attraktivität modelliert. Darüber hinaus stellt dieser Ansatz derzeit ebenso die allgemeinste Form von Zielwahlmodellen dar. So ist die Abbildung einfacher nur quelseitig fixierter Modelle ebenso möglich, wie die produktions- und/oder attraktionsseitige Verwendung unterschiedlicher Randsummenbedingungen innerhalb einer Nachfrageschicht. Zu dem Modellansatz werden die grundlegenden Theorien als auch verschiedene Beispiele vorgestellt. Dies stellt nicht nur eine weitere Verbesserung des Theoriegebildes dar, sondern wird auch die praktische Anwendbarkeit verbessern.

Steadily growing requirements on traffic demand models need corresponding model theories. For this reason a new macroscopic model approach is introduced in the article. During increasing occupancy of a destination this model calculates the decrease of destination (or origin) attractivity. Furthermore, this approach represents the most general form of distribution choice models currently. The transformation of simply models using only one-sided constraints is just as possible as using differential constraints of the production and/or attraction side within one demand group. For the approach different examples will also be represented. Finally this model approach is not only a theory improvement, it improves the practical applicability to.

Verfasseranschrift:
PD Dr.-Ing. habil. C. Schiller,
Deutsches Zentrum für
Luft- und Raumfahrt e.V.,
Institut für Verkehrs-
forschung,
Rutherfordstraße 2,
12489 Berlin,
christian.schiller@dlr.de

1 Einführung

Die Anforderungen an strategisch-prognostische Verkehrsnachfragemodelle haben sich speziell in den letzten Jahren durch die steigenden Anforderungen der Verkehrsplanung kontinuierlich erhöht. Integrierte Verkehrsplanungen schließen immer größere Räume ein, was im Umkehrschluss bedeutet, dass auch die Auswirkungen baulicher und verkehrstechnischer Maßnahmen auf die Verkehre in diesen größer werdenden Räumen abgebildet werden müssen. Durch die damit zunehmende Komplexität der entstehenden bzw. sich verändernden Verkehrsnachfrage ist eine Anwendung von hochwertigen Verkehrsnachfragemodellen unumgänglich. Leider ist es somit auch nicht mehr möglich, die Verkehrsnachfrage mit sehr einfachen Modellen hinreichend genau zu berechnen bzw. abzuschätzen, auch wenn sich dies sicherlich der Eine oder Andere wünscht oder erhofft.

Um den Anforderungen gerecht zu werden, existiert erwartungsgemäß ein äußerst breites Spektrum unterschiedlichster Theorien zur Abbildung der Verkehrsnach-

frage. Somit existieren auch vielfältige Ausprägungen, der in diesem Artikel betrachteten makroskopischen Verkehrsnachfragemodelle zur Berechnung der Zielwahl. Die dabei häufig gebräuchlichen nur quell- oder zieleitig fixierten Modelle, welche auf den entsprechend gegenüberliegenden Seiten „offen“ also nicht fixiert sind, beachten räumliche Restriktionen nur auf der fixierten Seite. Ein klassischer Vertreter ist z. B. ein quelseitig fixiertes Logitmodell, welches die in der Verkehrserzeugung berechneten Zielverkehrsaufkommen zwar als (zieleitige) Anziehungspotenziale nutzt, diese aber nicht direkt einhalten kann:

$$v_{ij} = \frac{e^{-\beta \cdot A_{ij} + \ln(Z_j)}}{\sum_{j'} e^{-\beta \cdot A_{ij'} + \ln(Z_{j'})}} \cdot Q_i \quad (1)$$

mit
Q Quellenverkehrsaufkommen
Z Zielverkehrsaufkommen
i Laufindex der Quelle ($i = 1, \dots, m$)
j Laufindex des Zieles ($j = 1, \dots, n$)
v Verkehrsstrom.

Bei der Anwendung eines quelseitig fixierten Logitmodells (Bild 1) ist deutlich zu erkennen, dass die Quell- und Zielverkehrsaufkommen (Q_i -Soll und Z_j -Soll) aus der Verkehrserzeugung, durch die Fixie-

rung innerhalb der Zielwahl nur auf der Quellseite (Q_i -Ist) eingehalten werden. Das Zielverkehrsaufkommen (Z_j -Ist) weist eine (teilweise sehr große) Divergenz auf. Dies ist beispielsweise im Bild 1 sehr gut in Verkehrszelle 1 zu erkennen. Das in der Verkehrserzeugung berechnete Verkehrsaufkommen von 25 Ortsveränderungen, steht im starken Gegensatz zu dem in der Zielwahl berechneten Verkehrsaufkommen von ca. 168 Ortsveränderungen. Dies begründet sich zum einen durch den sehr geringen Aufwand A zur Verkehrszelle 1, zum anderen durch das sehr geringe „Gewicht“ von 25 Ortsveränderungen auf der Zielseite.

Oft wird dann auch noch versucht, den Abstand zwischen Z_j -Ist und Z_j -Soll über Parameterkalibrierung zu minimieren. Nur ist dazu anzumerken, dass die Restriktion der Verkehrsaufkommen primär durch den Raum bestimmt ist und nicht durch das Verhalten der Verkehrsteilnehmer als Reaktion auf einen Aufwand. Und diese Reaktion soll mit den Parametern abgebildet werden.

Diese Modelltheorien gehen demnach davon aus, dass nur einseitige oder in anderen Fällen gar keine äußere Restriktionen die Wahl des Individuums beeinflussen. Das Nichtvorhandensein von Restriktionen

¹ Einen guten Überblick darüber bieten beispielsweise Ortúzar et al. [6]

Bild 1: Aufwands- und Verkehrsstrommatrix eines quellsseitig fixierten Logitmodells ($\beta = 0,01$)

A _{ij}	1	2	3	4	5
1	9999	2	1	5	7
2	2	9999	11	15	25
3	1	11	9999	4	14
4	5	15	4	9999	18
5	7	25	14	18	9999

v _{ij}	1	2	3	4	5
1	0,00	13,39	14,00	11,71	10,90
2	39,98	0,00	24,16	21,37	14,49
3	16,50	10,02	0,00	14,17	9,31
4	32,63	18,58	31,17	0,00	17,62
5	79,07	29,62	48,07	43,24	0,00

Z _j -ist	168,18	71,61	117,40	90,49	52,32
Z _j -Soll	25,00	125,00	175,00	100,00	75,00

Q _i -ist	50,00	100,00	50,00	100,00	200,00
Q _i -Soll	50,00	100,00	50,00	100,00	200,00

500,00

nen (auch Neben- bzw. Randsummenbedingungen genannt, da sich die Bedingungen auf die Quell- und Zielverkehrsaufkommen – die Randsummen der Verkehrsstrommatrix – beziehen) erlaubt also die Nutzenmaximierung des Verkehrsteilnehmers im offenen Entscheidungsraum. Allerdings entspricht dies nicht der realen Situation bzw. dem realen Verkehrsgeschehen! Denn im tatsächlichen Verkehrsgeschehen existieren entscheidende unterschiedliche Abhängigkeiten des Verkehrsaufkommens von quell- und zieleitigen Raumstrukturpotenzialen, auch oft in Verknüpfung mit der Lagegunst.

Im Heft 7/2006 von Straßenverkehrstechnik wurde im Artikel „Gekoppelte Verkehrsnachfragemodelle – Ein grundlegendes Modell“ ein Zielwahlmodell (erweitert zu einem simultanen Ziel- und Verkehrsmittelwahlmodell) vorgestellt, welches durch die Nutzung minimaler und maximaler Randsummenbedingungen als die allgemeine Form der von Kirchhoff [2] und Lohse [4, 5] beschriebenen Modelle mit Neben- bzw. Randsummenbedingungen angesehen werden kann:

$$v_{ij} = B_{ij} \cdot f_{q_i} \cdot f_{z_j}$$

$$Q_i^{\min} \leq Q_i = \sum_j v_{ij} \leq Q_i^{\max} \quad (2)$$

$$Z_j^{\min} \leq Z_j = \sum_i v_{ij} \leq Z_j^{\max}$$

mit

B Bewertung (des Aufwandes)

Q_i^{max} max. Quellverkehrsaufkommen (aus Verkehrserzeugung)Q_i^{min} min. Quellverkehrsaufkommen (aus Verkehrserzeugung)Z_j^{max} max. Zielverkehrsaufkommen (aus Verkehrserzeugung)Z_j^{min} min. Zielverkehrsaufkommen (aus Verkehrserzeugung)

f Korrekturfaktoren.

Die Verkehrsströme in Formel (2) ergeben sich aus den Bewertungen der Aufwände (z. B.: Reisezeit, (generalisierte) Kosten etc.) und den beschränkenden Randsummenbedingungen, welche über die Faktoren f_{q_i} und f_{z_j} während der iterativen Lösung eingehalten werden. Durch die einzuhaltenen Randsummenbedingungen kommt, im

Gegensatz zu Modellen ohne Randsummenbedingungen, zur Nutzenmaximierung eine beschränkende Auflage hinzu. Die Verkehrsteilnehmer streben zwar immer noch nach dem Nutzenmaximum, können es aber durch die einschränkenden Randsummenbedingungen nicht mehr im gleichen Maße erreichen. So versuchen die Verkehrsteilnehmer dem Nutzenmaximum möglichst nahe zu kommen und den entstehenden Nutzenverlust zu minimieren. Das bedeutet, dass durch das konkurrierende Entscheidungsverhalten der Verkehrsteilnehmer die Matrix im Ereignisraum mit Randsummenbedingungen (Realisierung bei der a-posteriori-Bewertung der Verkehrsteilnehmer) von der Matrix im Ereignisraum ohne Randsummenbedingungen (Realisierung der a-priori-Bewertung der Verkehrsteilnehmer) geringstmöglich abweicht. Somit ist die Aussage möglich, dass die durch die bewerteten Alternativen bestimmten a-priori-Bewertungen der Verkehrsteilnehmer im Zusammenspiel mit den eingesetzten Randsummenbedingungen über die zulässige a-posteriori-Lösung der Verkehrsströme bestimmen.

Dadurch, dass die Verkehrsteilnehmer das Nutzenmaximum durch die einschränkenden Randsummenbedingungen nicht mehr im gleichen Maße erreichen können und trotzdem versuchen dem Nutzenmaximum möglichst nahe zu kommen bzw. den entstehenden Nutzenverlust zu minimieren versuchen, stellt der Bewertungs- und Entscheidungsvorgang der Verkehrsteilnehmer eine Minimierung des „Nutzenverlustes“ dar. Dieser „Nutzenverlust“ kann modelltheoretisch durch die Minimierung eines zu definierenden Abstandsmaßes zwischen zwei Zuständen α und β nachgebildet werden. Die Informationstheorie stellt hierbei mit der Informationsgewinnminimierung eine adäquate Methode zur Verfügung, um den Nutzenverlust geringstmöglichst zu halten:

$$I = - \sum \left[\alpha \cdot \ln \left(\frac{\alpha}{\beta} \right) \right] \quad (3)$$

Die beiden Zustände α und β können hierbei als der Startwert (die Bewertung der Aufwände B_{ij}) und der Zielwert (die Ver-

kehrsströme v_{ij} unter Beachtung der Randsummenbedingungen) angenommen werden:

$$I = \sum_i \sum_j \left[v_{ij} \cdot \ln \left(\frac{v_{ij}}{B_{ij}} \right) \right] \quad (4)$$

Somit kann das Modell mit Randsummenbedingungen auch als Extremwertmodell mit Nebenbedingungen beschrieben werden, wobei die Zielfunktion die Minimierung des Informationsgewinns von der gegebenen Bewertungsmatrix auf die gesuchte Verkehrsstrommatrix ist. Um die Minimierung des Informationsgewinns zu berechnen, können verschiedene Optimierungsalgorithmen eingesetzt werden, welche ausführlich in Kirchhoff [2], Lohse et al. [5] und Schiller [9] vorgestellt werden.

Hierbei bildet der beschriebene Modellansatz die unterschiedlichen Abhängigkeiten des Verkehrsaufkommens von quell- und zieleitigen Raumstrukturpotenzialen sowie der Lagegunst ab und kann alle bis dato bekannten Randsummenbedingungen berechnen, womit auch die oft notwendigen und sinnvollen Standard- und Sonderfälle modelliert werden können.

Ein erster Standardfall ergibt sich bei räumlich nicht substituierbaren² Pflicht-Aktivitäten (z. B.: Arbeit, Bildung), bei denen nicht unmittelbar das Aktivitätsziel verändert werden kann. Der Erwartungswert des entsprechenden Verkehrsaufkommens berechnet sich ausschließlich aus den maßgebenden Strukturgrößen. Die Lagegunst spielt für die Einhaltung der Randsumme keine Rolle. Es ergibt sich demnach eine Randsummenbedingung, bei der das innerhalb der Verkehrserzeugung berechnete Verkehrsaufkommen, während der Berechnung der Verkehrsverteilung als unelastisch anzunehmen und damit einzuhalten ist:

² Als nicht substituierbare Ziele werden Ziele bezeichnet, die aufgesucht werden müssen und nicht (ständig) neu ausgesucht bzw. gewechselt werden können (z. B. Arbeit, Schule). Bei substituierbaren Zielen ist dies nicht der Fall. Hier kann (ständig neu) in Abhängigkeit der Prämissen entschieden werden, welches Ziel aufgesucht wird (z. B. Einkaufen, Freizeit). Allerdings ist darunter nicht zu verstehen, dass zum Beispiel statt Arbeiten Einkaufen gewählt wird.

$$v_{ij} = B_{ij} \cdot f_{q_i} \cdot f_{z_j}$$

$$Q_i^{\min} \leq Q_i = \sum_j v_{ij} \leq Q_i^{\max}, \text{ wobei } Q_i^{\min} = Q_i^{\max} \quad (5)$$

$$Z_j^{\min} \leq Z_j = \sum_i v_{ij} \leq Z_j^{\max}, \text{ wobei } Z_j^{\min} = Z_j^{\max}$$

Beispiel 1: Zielwahlmodell mit beidseitig unelastischen Randsummenbedingung aus Gl. (5) (Bilder 2 und 3).

Um die Sicht auf das Beispiel 1 (Bilder 2 und 3) zu vereinfachen, soll für die Quellverkehrszone 1 der iterative Lösungsverlauf dargestellt werden. So ist im Bild 4 zu erkennen, wie der Lösungsalgorithmus, ausgehend von der Bewertung im Iterationsschritt 0, in jedem Schritt p den (Korrektur-)Faktor f_{q_1} für den Iterationsschritt $p+1$ berechnet, um sich den Randsummenbedingungen zu nähern und diese letztendlich exakt zu erfüllen. (Eigentlich muss dies stets in Zusammenhang mit f_{z_j} betrachtet werden, was allerdings zur Vereinfachung hier vernachlässigt werden soll.) Der zweite Standardfall entsteht, wenn im Gegensatz zu unelastischen Randsummenbedingungen sich bei substituierbaren Aktivitäten (z. B.: Einkaufen, Freizeit, Sonstiges) der Erwartungswert des Verkehrsaufkommens nicht mehr ausschließlich durch die maßgebenden Strukturgrößen ergibt. Daneben spielt die Lagegunst bei der Wahl konkurrierender Aktivitäten ebenfalls eine entscheidende Rolle. So lange das mit dem geringsten Aufwand zu erreichende Ziel noch nicht durch andere „konkurrierende“ Verkehrsteilnehmer ausgelastet ist, werden die Verkehrsteilnehmer dieses Ziel mit größerer Wahrscheinlichkeit auswählen. Bei Auslastung ändern sie ihre Zielwahl entsprechend. Die Verkehrserzeugung berechnet also in diesem Fall nur minimale und maximale Verkehrsaufkommen³, die allerdings nicht ausgeschöpft werden

³ Beachte: Die minimalen und maximalen Verkehrsaufkommen dienen innerhalb der Zielwahl „nur als Grenzen“ der sich ergebenden Verkehrsaufkommen. Allerdings sind bei elastischen Randsummenbedingungen nicht nur die Lagegunst und die begrenzenden Verkehrsaufkommen der Ziele relevant, sondern auch der Bekanntheitsgrad. Dies begründet sich dadurch, dass größere Potenziale wahrscheinlichkeitstheoretisch bekannter sind und somit eine größere Anziehungskraft als kleinere Potenziale ausüben. Somit wirkt der Bekanntheitsgrad als zusätzliches Anziehungspotenzial und wird prinzipiell über eine zusätzliche aber von der Bewertung des Aufwandes unabhängige vektorielle Gewichtunggröße in die Bewertung eingebracht. I.d.R. wird diese zusätzliche Gewichtunggröße über das maximale Verkehrsaufkommen quantifiziert (vgl. z. B. Schiller [8]).

vij	1	2	3	4	5
1	0,00	0,99	1,00	0,98	0,98
2	0,99	0,00	0,96	0,92	0,73
3	1,00	0,96	0,00	0,99	0,93
4	0,98	0,92	0,99	0,00	0,88
5	0,98	0,73	0,93	0,88	0,00

Zj-ist	3,95	3,60	3,87	3,78	3,53
Zj-Soll (min RSB)	25,00	125,00	175,00	100,00	75,00
Zj-Soll (max RSB)	25,00	125,00	175,00	100,00	75,00

Qi-ist	Qi-Soll (min)	Qi-Soll (max)
3,95	50,00	50,00
3,60	100,00	100,00
3,87	50,00	50,00
3,78	100,00	100,00
3,53	200,00	200,00

18,73

Bild 2: Startmatrix (Matrixinhalt: Bewertungen der Aufwände) im Beispiel 1

vij	1	2	3	4	5
1	0,00	14,13	15,08	9,76	11,02
2	5,95	0,00	42,66	26,95	24,44
3	2,82	18,92	0,00	13,63	14,63
4	4,99	32,75	37,34	0,00	24,91
5	11,24	59,19	79,91	46,66	0,00

Zj-ist	25,00	125,00	175,00	100,00	75,00
Zj-Soll (min RSB)	25,00	125,00	175,00	100,00	75,00
Zj-Soll (max RSB)	25,00	125,00	175,00	100,00	75,00

Qi-ist	Qi-Soll (min)	Qi-Soll (max)
50,00	50,00	50,00
100,00	100,00	100,00
50,00	50,00	50,00
100,00	100,00	100,00
200,00	200,00	200,00

500,00

Bild 3: Ergebnismatrix (Matrixinhalt: Verkehrsströme) im Beispiel 1

Iteration p	vij	1	2	3	4	5
0	1	0,00	0,99	1,00	0,98	0,98
1	1	0,00	26,52	26,60	26,27	26,08
2	1	0,00	14,44	15,62	10,32	11,37
3	1	0,00	14,16	15,14	9,81	11,05
4	1	0,00	14,14	15,09	9,77	11,03
5	1	0,00	14,13	15,08	9,76	11,02
6	1	0,00	14,13	15,08	9,76	11,02

Qi-ist	Qi-Soll (min)	Qi-Soll (max)	fqi für p+1
3,95	50,00	50,00	26,702
105,47	50,00	50,00	0,491
51,75	50,00	50,00	0,969
50,16	50,00	50,00	0,997
50,02	50,00	50,00	1,000
50,00	50,00	50,00	1,000
50,00	50,00	50,00	1,000

Bild 4: Iterativer Lösungsverlauf für Quellverkehrszone 1 im Beispiel 1

müssen. Bei der Zielwahl werden die Verkehrsströme proportional zu den begrenzenden Verkehrsaufkommen und der Lagegunst berechnet. Dabei gilt jedoch die Nebenbedingung die maximalen Verkehrsaufkommen der Verkehrszellen nicht zu überschreiten und die minimalen Verkehrsaufkommen nicht zu unterschreiten:

$$v_{ij} = B_{ij} \cdot f_{q_i} \cdot f_{z_j}$$

$$Q_i^{\min} \leq Q_i = \sum_j v_{ij} \leq Q_i^{\max}, \text{ wobei } Q_i^{\min} \neq Q_i^{\max} \quad (6)$$

$$Z_j^{\min} \leq Z_j = \sum_i v_{ij} \leq Z_j^{\max}, \text{ wobei } Z_j^{\min} \neq Z_j^{\max}$$

Beispiel 2: Zielwahlmodell mit quellseitig unelastischen (aus Gl. (5)) und zielseitig elastischen Randsummenbedingung (aus Gl. (6)) (Bilder 5 und 6).

Im Bild 6 ist sehr gut zu erkennen, wie die Verkehrszelle 2 aufgrund ihrer hohen

Lagegunst bis zum max. Zielverkehrsaufkommen ausgelastet wird. Eine Überschreitung dieses Maximums ist durch die Randsummenbedingungen nicht möglich. Verkehrsteilnehmer, die eventl. auch noch dieses Ziel aufsuchen würden, müssen auf andere Ziele ausweichen.

Auch für dieses Beispiel soll zur Verdeutlichung der iterative Lösungsverlauf (mit der Bestimmung des (Korrektur-)Faktors f_{z_1}) für die Zielverkehrszelle 1 dargestellt werden. So ist im Bild 7 zu erkennen, wie der Lösungsalgorithmus den (Korrektur-)Faktor f_{z_1} berechnet, ohne die Randsummenbedingungen zu verletzen.

Bei Verwendung von elastischen Randsummenbedingungen ergibt sich das Verkehrsaufkommen aus den maßgebenden Strukturgrößen und der Lagegunst der

vij	1	2	3	4	5
1	0,00	0,99	1,00	0,98	0,98
2	0,99	0,00	0,96	0,92	0,73
3	1,00	0,96	0,00	0,99	0,93
4	0,98	0,92	0,99	0,00	0,88
5	0,98	0,73	0,93	0,88	0,00

Zj-ist	3,95	3,60	3,87	3,78	3,53
Zj-Soll (min RSB)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Zj-Soll (max RSB)	150,00	60,00	175,00	175,00	100,00

Qi-ist	Qi-Soll (min)	Qi-Soll (max)
3,95	50,00	50,00
3,60	100,00	100,00
3,87	50,00	50,00
3,78	100,00	100,00
3,53	200,00	200,00

18,73

Bild 5: Startmatrix (Matrixinhalt: Bewertungen der Aufwände) im Beispiel 2

vij	1	2	3	4	5
1	0,00	8,37	14,02	13,85	13,75
2	27,56	0,00	26,51	25,56	20,37
3	14,28	8,21	0,00	14,16	13,36
4	28,89	16,20	28,98	0,00	25,93
5	60,45	27,22	57,65	54,68	0,00

Zj-ist	131,17	60,00	127,16	108,26	73,41
Zj-Soll (min RSB)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Zj-Soll (max RSB)	150,00	60,00	175,00	175,00	100,00

Qi-ist	Qi-Soll (min)	Qi-Soll (max)
50,00	50,00	50,00
100,00	100,00	100,00
50,00	50,00	50,00
100,00	100,00	100,00
200,00	200,00	200,00

500,00

Bild 6: Ergebnismatrix (Matrixinhalt: Verkehrsströme) im Beispiel 2

Bild 7 Iterativer Lösungsverlauf für Zielverkehrszelle 1 im Beispiel 2

Iteration p	0	1	2	3	4	5	6
v_{ij}	1	1	1	1	1	1	1
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,99	26,52	27,36	27,55	27,56	27,56	27,56
3	1,00	26,60	14,09	14,25	14,28	14,28	14,28
4	0,98	26,27	28,49	28,82	28,87	28,88	28,89
5	0,98	26,08	59,68	60,32	60,43	60,44	60,45
Zj-ist	3,95	105,47	129,62	130,94	131,14	131,17	131,17
Zj-Soll (min RSB)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Zj-Soll (max RSB)	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00
fzj für p+1	26,702	1,229	1,010	1,002	1,000	1,000	1,000

konkurrierenden Aktivitäten. Demzufolge wählt ein Verkehrsteilnehmer so lange das lagegünstigste Ziel mit größerer Wahrscheinlichkeit aus, wie es durch andere Verkehrsteilnehmer noch nicht ausgelastet ist. Bei kompletter Auslastung oder Überlastung ändert sich seine Zielwahl.

2 Modellierung auslastungsabhängiger Attraktivitäten

Allerdings können die im vorherigen Abschnitt betrachteten Auslastungen auch als empfundene Auslastungen interpretiert werden und unterschiedliche Ausprägungen besitzen. Um diese Aussage zu verdeutlichen sollen als Beispiel mehrere alternative Ziele existieren, wobei jedes dieser Ziele bis zu 100 % seiner Kapazität ausgelastet werden kann⁴. Folgende Reaktionen auf die zunehmende Auslastung eines Zieles durch die Verkehrsteilnehmer können entstehen:

- Die erhöhten Warte- und Bedienungszeiten, die sich durch eine hohe Auslastung bedingen (beispielsweise bei 80 bis 90 %), lassen das Ziel für den Kunden nicht unattraktiver als bei geringer Auslastung erscheinen. Das Ziel wird bei bestehender Nachfrage bis zu 100 % seiner Kapazität ausgefüllt, ohne dass sich bezüglich der Warte- und Bedienungszeiten eine Nachfrageminderung ergibt. In diesem Fall existiert also keine auslastungsabhängige Attraktivitätsveränderung. Da eine Überschreitung der Kapazität nicht möglich ist, werden ab Erreichung der Kapazität von den Verkehrsteilnehmern je nach Lagegunst andere konkurrierende Ziele gewählt.
- Die erhöhten Warte- und Bedienungszeiten lassen das Ziel für den Kunden unattraktiver als bei geringerer Auslastung erscheinen. Die Verkehrsteilnehmer bewerten den der Ortsveränderung und einen zusätzlichen Aufwand am Ziel. Bei steigender Auslastung verringert sich die Lagegunst, aber auch die Attraktivität des Zieles. Andere konkurrierende Ziele gewinnen damit an Attraktivität. In diesem Fall existiert bei einer Auslastungszunahme eine entsprechende Abnahme der Attraktivität, also eine auslastungsabhängige Attraktivitätsveränderung. Diese Verhaltensweise soll mit dem neuen Modellansatz abgebildet werden.

kurrierende Ziele gewinnen damit an Attraktivität. In diesem Fall existiert bei einer Auslastungszunahme eine entsprechende Abnahme der Attraktivität, also eine auslastungsabhängige Attraktivitätsveränderung. Diese Verhaltensweise soll mit dem neuen Modellansatz abgebildet werden.

Anmerkung des Autors: Die folgenden Abschnitte beschäftigen sich fast ausschließlich mit der modelltheoretischen bzw. mathematischen Herleitung. Dieser Teil ist zur theoretischen Durchdringung des Modells sehr wichtig, jedoch ist es ebenso verständlich, dass nicht jeder Leser mit dem notwendigen Enthusiasmus diese Formeln durcharbeiten bzw. sich erarbeiten möchte. Dies soll ausdrücklich keine Aufforderung zum Überblättern der Formeln sein! Jedoch soll dem Leser die Möglichkeit geboten werden, den Aufsatz an dieser geeigneten Stelle zu verlassen, um den theoretischen Teil der Arbeit (vorerst) zu überspringen. Zum Wiedereinstieg in die Arbeit ist der Abschnitt 3 „Beispielmodellierung auslastungsabhängiger Attraktivitäten“ bestmöglich geeignet. So kann trotz Auslassung der Theorie die Phänomenologie auslastungsabhängiger Attraktivitäten sehr gut durchdrungen werden.

Aufbauend auf dem Beispiel 2 (Zielwahlmodell mit quellseitig unelastischen und zieleitig elastischen Randsummenbedingung) des vorherigen Abschnittes soll im Anschluss die Modellierung auslastungsabhängiger Attraktivitäten gezeigt werden. Speziell zur Vereinfachung werden quellseitig unelastische und nur zieleitig elastische Randsummenbedingungen mit auslastungsabhängiger Attraktivität betrachtet. Aus dem dort verwendeten Grundmodell (2) entsteht bei der Modellierung auslastungsabhängiger Attraktivitäten folgende Form:

$$v_{ij} = (B_{ij} \cdot b_j(Z_j)) \cdot f_{q_i} \cdot f_{z_j}$$

$$Q_i^{\min} \leq Q_i = \sum_j v_{ij} \leq Q_i^{\max}, \text{ wobei } Q_i^{\min} = Q_i^{\max} \quad (7)$$

$$Z_j^{\min} \leq Z_j = \sum_i v_{ij} \leq Z_j^{\max}, \text{ wobei } Z_j^{\min} \neq Z_j^{\max}$$

Hierbei ist gut zu erkennen, dass die Bewertung der Aufwände B_{ij} von einer zusätzlichen Funktion abhängig ist, dem bereits erklärten zusätzlichen Aufwand am Ziel $b_j(Z_j)$. Ebenso ist zu beachten, dass Gl. (8) keine Randsummenbedingung des

Gleichungssystems darstellt, sondern zur Ermittlung des iterationsschrittfeinen (in der Zielwahl zu bestimmenden) Zielverkehrsaufkommens dient:

$$B_{ij} := B_{ij} \cdot b_j(Z_j) \quad (8)$$

$$\sum_i v_{ij} = Z_j$$

Infolgedessen wird, wie bereits in Schiller (vgl. [7] S. 50 ff.) angedeutet, eine „Elastizität“ der Bewertung bzw. eine auslastungsabhängige Attraktivität gegenüber einem wachsenden Zielverkehrsaufkommen erreicht.

Um das in Gl. (7) gezeigte Gleichungssystem zu lösen⁵, kann durch die zusätzliche Voraussetzung

$$\Gamma_j(Z_j) = -Z_j \cdot \ln b_j(Z_j) \quad (9)$$

die Lösung als Spezialfall des Bregman-Algorithmus [1] zur Lösung bestimmter konvexer Optimierungsprobleme

$$I = \sum_i \sum_j \left[v_{ij} \cdot \ln \left(\frac{v_{ij}}{B_{ij} \cdot b_j(Z_j)} \right) - v_{ij} \right] \rightarrow \text{Min!}$$

$$= \sum_i \sum_j \left[v_{ij} \cdot \ln \left(\frac{v_{ij}}{B_{ij}} \right) - v_{ij} \right] \quad (10)$$

$$- \sum_j Z_j \cdot \ln b_j(Z_j) \rightarrow \text{Min!}$$

dargestellt werden. Entsprechend ergeben sich die Lagrange-Funktion

$$\Phi = \sum_i \sum_j \left[v_{ij} \cdot \ln \left(\frac{v_{ij}}{B_{ij}} \right) - v_{ij} \right]$$

$$+ \sum_i o_i \cdot \left(Q_i^{\min} - \sum_j v_{ij} \right)$$

$$+ \sum_i \lambda_i \cdot \left(\sum_j v_{ij} - Q_i^{\max} \right) \quad (11)$$

$$+ \sum_j \mu_j \cdot \left(Z_j^{\min} - \sum_i v_{ij} \right)$$

$$+ \sum_j v_j \cdot \left(\sum_i v_{ij} - Z_j^{\max} \right)$$

$$- \sum_j Z_j \cdot \ln b_j(Z_j)$$

sowie die Nichtnegativitäts- und Komplementaritätsbedingungen in den Kuhn-Tucker-Bedingungen:

⁴ Bei elastischen Randsummenbedingungen ist dies, wie bereits ausgeführt, auch von der Lagegunst abhängig.

⁵ Zum folgenden Abschnitt sei erwähnt, dass im ersten Teil (Gl. (9) bis Gl. (17)) eine rein mathematische Betrachtung zur Beleuchtung des modelltheoretischen Hintergrundes erfolgt. Das eigentliche (sehr vereinfachte) Lösungsverfahren wird im zweiten Teil mit Lösungsbeispielen gezeigt.

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{v_{ij}}{B_{ij}}\right) + ((\lambda_i - o_i) + (v_j - \mu_j) + p_j) &= 0 \\ -\ln b_j(Z_j) - G_j(Z_j) - p_j &= 0 \\ Q_i^{\min} - \sum_j v_{ij} \leq 0 \quad \sum_i v_{ij} - Q_i^{\max} \leq 0 \\ Z_j^{\min} - \sum_i v_{ij} \leq 0 \quad \sum_i v_{ij} - Z_j^{\max} \leq 0 \\ \sum_i v_{ij} - Z_j &= 0 \\ o_i \geq 0 \quad \lambda_i \geq 0 \quad \mu_j \geq 0 \quad v_i \geq 0 \end{aligned} \quad (12)$$

Nichtnegativitätsbedingung

$$\left. \begin{aligned} \sum_i o_i (Q_i^{\min} - \sum_j v_{ij}) &= 0 \\ \sum_j \lambda_i \cdot (\sum_j v_{ij} - Q_i^{\max}) &= 0 \\ \sum_j \mu_j (Z_j^{\min} - \sum_i v_{ij}) &= 0 \\ \sum_j v_j \cdot (\sum_i v_{ij} - Z_j^{\max}) &= 0 \end{aligned} \right\} \text{Komplementaritätsbedingung}$$

Dabei ergibt sich die Elastizität an der Stelle Z_j durch folgenden Ausdruck:

$$B_j(Z_j) = Z_j \cdot \frac{d}{dZ_j} (\ln x_j(Z_j)) = Z_j \cdot \frac{b'_j(Z_j)}{b_j(Z_j)} \quad (13)$$

Aus den Gl. (7) bis (12) berechnet sich die gesuchte optimale Lösung durch

$$v_{ij} = B_{ij} \cdot e^{-((\lambda_i - o_i) + (v_j - \mu_j) + p_j)} = B_{ij} \cdot b_j(Z_j) \cdot e^{(G_j(Z_j) - ((\lambda_i - o_i) + (v_j - \mu_j) + p_j))}, \quad (14)$$

was wiederum in der allgemeinen Schreibweise

$$\begin{aligned} v_{ij} &= (B_{ij} \cdot b_j(Z_j)) \cdot f_{q_i} \cdot f_{z_j} = B_{ij} \cdot f_{q_i} \cdot f_{z_j} \\ Q_i^{\min} \leq Q_i = \sum_j v_{ij} \leq Q_i^{\max}, \text{ wobei } Q_i^{\min} &= Q_i^{\max} \quad (15) \\ Z_j^{\min} \leq Z_j = \sum_i v_{ij} \leq Z_j^{\max}, \text{ wobei } Z_j^{\min} &\neq Z_j^{\max} \end{aligned}$$

ausgedrückt werden kann. Der Faktor f_{z_j} ergibt sich aus

$$f_{z_j} := f_{z_j} \cdot b_j(Z_j) = F_j(Z_j) \cdot \exp(\mu_j - v_j) \quad (16)$$

mit

$$F_j(Z_j) = (Z_j) \cdot b_j(Z_j) \cdot e^{(B_j(Z_j))} = e^{(-\frac{d}{dZ_j} r_j(Z_j))} \quad (17)$$

Hierbei sei noch angemerkt, dass in der menschlichen Entscheidung tatsächlich ein Aggregat aus B_{ij} und b_j besteht, da der Verkehrsteilnehmer aus Erfahrungen einschätzen kann, wie stark sein potenzielles Ziel ausgelastet ist und somit den Aufwand zum Ziel und den Aufwand am Ziel gemeinsam betrachtet. Innerhalb der Modellierung ist die Bewertung des Aufwandes zum Ziel auch bekannt, jedoch nicht der Aufwand am Ziel, da das sich ergebende Zielverkehrsaufkommen gerade erst innerhalb der Zielwahl berechnet wird. Somit kann auch erst der Faktor b_j innerhalb der Zielwahl bestimmt werden. Dieser geht dann im Faktor f_{z_j} mit auf.

Zur iterativen Lösung des hergeleiteten Gleichungssystems kommen relativ komplizierte FURNESS- und MULTI-Verfahren zur Anwendung, welche in diesem Artikel aus Platzgründen nicht in der Tiefe vorgestellt werden sollen. Bei allen Verfahren werden die Faktoren aus Gl. (15) (f_{q_i} und f_{z_j}) über iterative Näherungen bestimmt. Dies bedeutet, dass beispielsweise mit $\prod_p f_{z_j}(p)$ im eigentlichen Sinne nur eine Näherung an das tatsächliche endgültige f_{z_j} berechnet wird, also $\prod_p f_{z_j}(p) \cong f_{z_j}$. Allerdings ist diese Näherung völlig ausreichend.

Bei der Lösung des Gleichungssystems (15) (hier am Beispiel eines sehr stark vereinfachten FURNESS-Modells zur Bestimmung der quelseitig unelastischen f_{q_i} und der nur zieleitig elastischen f_{z_j} mit auslastungsabhängiger Attraktivität gezeigt)

$$f_{q_i}(p+1) = \begin{cases} \frac{Q_i^{\min}}{\sum_j B_{ij} \cdot f_{z_j}(p+1)} & \text{wenn } Q_i < Q_i^{\min} \\ 1 & \text{wenn } Q_i^{\min} \leq Q_i \leq Q_i^{\max} \\ \frac{Q_i^{\max}}{\sum_j B_{ij} \cdot f_{z_j}(p+1)} & \text{wenn } Q_i^{\max} < Q_i \end{cases}$$

p Iterationsschritt

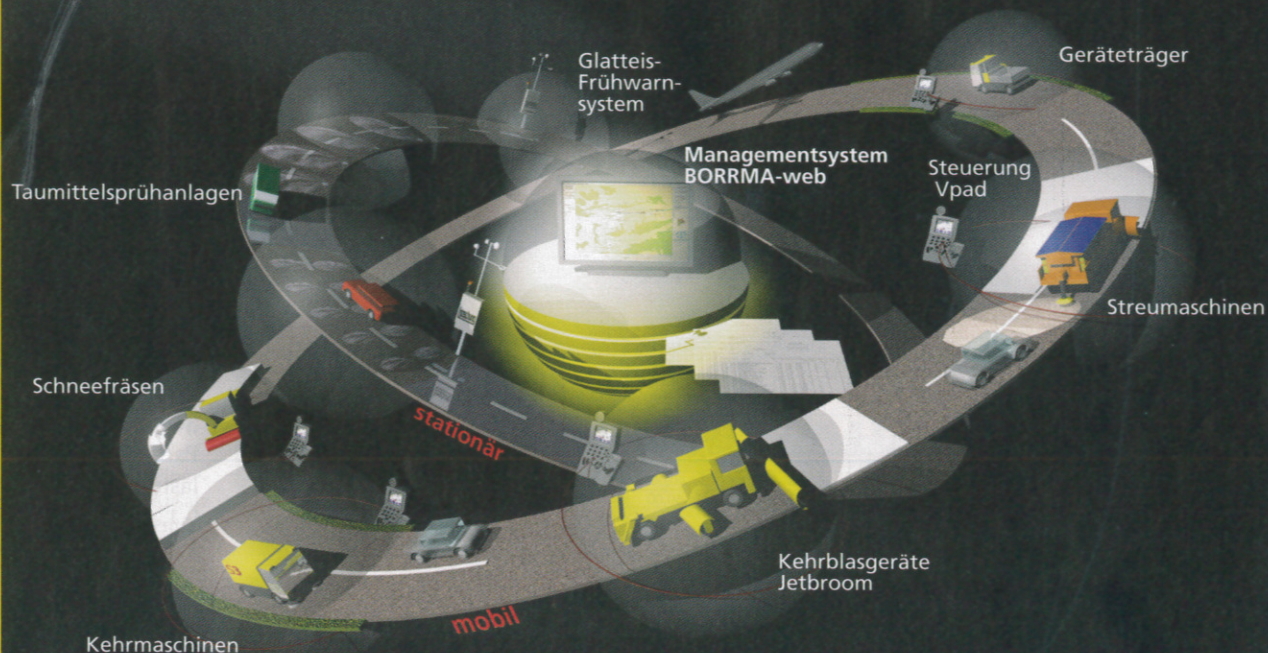
$$f_{z_j}(p+1) = \begin{cases} \frac{Z_j^{\min}}{\sum_i B_{ij} \cdot f_{q_i}(p+1)} & \text{wenn } Z_j < Z_j^{\min} \\ x_j(p) & \text{wenn } Z_j^{\min} \leq Z_j \leq Z_j^{\max} \\ \frac{Z_j^{\max}}{\sum_i B_{ij} \cdot f_{q_i}(p+1)} & \text{wenn } Z_j^{\max} < Z_j \end{cases} \quad (18)$$

tritt folgendes in Bezug auf Z_j ein:

- würde die Untergrenze Z_j^{\min} unterschritten, wird f_{z_j} so berechnet, dass $\sum_i v_{ij} = Z_j^{\min}$
- würde weder die Untergrenze Z_j^{\min} unterschritten, noch die Obergrenze Z_j^{\max} überschritten, ergibt sich f_{z_j} ausschließ-

Surface Condition Management

Das Boschung Universum – Starke Produkte im perfekten Verbund



boschung
www.boschung.com

KUPPER WEISSER
www.kuepper-weisser.de

vij	1	2	3	4	5
1	0,00	0,99	1,00	0,98	0,98
2	0,99	0,00	0,96	0,92	0,73
3	1,00	0,96	0,00	0,99	0,93
4	0,98	0,92	0,99	0,00	0,88
5	0,98	0,73	0,93	0,88	0,00

Zj-ist	3,95	3,60	3,87	3,78	3,53
Zj-Soll (min RSB)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Zj-Soll (max RSB)	150,00	60,00	175,00	175,00	100,00

Bild 8: Startmatrix (Matrixinhalt: Bewertungen, Parameter $\alpha = 0$) im Beispiel 3

vij	1	2	3	4	5
1	0,00	8,37	14,02	13,85	13,75
2	27,56	0,00	26,51	25,56	20,37
3	14,28	8,21	0,00	14,16	13,36
4	28,89	16,20	28,98	0,00	25,93
5	60,45	27,22	57,65	54,68	0,00

Zj-ist	131,17	60,00	127,16	108,26	73,41
Zj-Soll (min RSB)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Zj-Soll (max RSB)	150,00	60,00	175,00	175,00	100,00

Bild 9: Ergebnismatrix (Matrixinhalt: Verkehrsströme, Parameter $\alpha = 0$) im Beispiel 3Bild 10: Iterativer Lösungs-
verlauf für Zielverkehrszelle
2 im Beispiel 3

Iteration p	0	1	2	3	4	5	6
vij	1	1	1	1	1	1	1
1	0,99	26,52	9,09	8,48	8,39	8,38	8,38
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,96	25,51	8,91	8,31	8,22	8,21	8,21
4	0,92	24,60	17,60	16,41	16,23	16,20	16,20
5	0,73	19,60	29,60	27,58	27,27	27,23	27,22
Zj-ist	3,60	96,23	65,20	60,78	60,12	60,02	60,00
Zj-Soll (min RSB)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Zj-Soll (max RSB)	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00
fzj für p+1	26,702	0,678	0,932	0,989	0,998	1,000	1,000

vij	1	2	3	4	5
1	0,00	0,99	1,00	0,98	0,98
2	0,99	0,00	0,96	0,92	0,73
3	1,00	0,96	0,00	0,99	0,93
4	0,98	0,92	0,99	0,00	0,88
5	0,98	0,73	0,93	0,88	0,00

Zj-ist	3,95	3,60	3,87	3,78	3,53
Zj-Soll (min RSB)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Zj-Soll (max RSB)	150,00	60,00	175,00	175,00	100,00

Bild 11: Startmatrix (Matrixinhalt: Bewertungen, Parameter $\alpha = 0,1$) im Beispiel 4

vij	1	2	3	4	5
1	0,00	7,72	14,24	14,07	13,96
2	27,56	0,00	26,51	25,56	20,37
3	14,50	7,56	0,00	14,37	13,56
4	29,32	14,93	29,42	0,00	26,33
5	61,21	25,02	58,38	55,38	0,00

Zj-ist	132,60	55,24	128,55	109,39	74,22
Zj-Soll (min RSB)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Zj-Soll (max RSB)	150,00	60,00	175,00	175,00	100,00

Bild 12: Ergebnismatrix (Matrixinhalt: Verkehrsströme, Parameter $\alpha = 0,1$) im Beispiel 4Bild 13: Iterativer Lösungs-
verlauf für Zielverkehrszelle
2 im Beispiel 4

Iteration p	0	1	2	3	4	5	6
vij	1	1	1	1	1	1	1
1	0,99	26,52	8,10	7,72	7,72	7,72	7,72
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,96	25,51	7,93	7,57	7,56	7,56	7,56
4	0,92	24,60	15,67	14,94	14,93	14,93	14,93
5	0,73	19,60	26,35	25,08	25,03	25,03	25,02
Zj-ist	3,60	96,23	58,05	55,31	55,24	55,24	55,24
Zj-Soll (min RSB)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Zj-Soll (max RSB)	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00
fzj für p+1	26,702	0,603	0,953	0,999	1,000	1,000	1,000

vij	1	2	3	4	5
1	0,00	6,56	8,02	6,50	3,92
2	40,11	0,00	39,04	30,90	14,95
3	56,62	45,09	0,00	46,60	26,69
4	30,82	23,96	31,28	0,00	13,95
5	22,45	14,02	21,66	16,87	0,00

Zj-ist	150,00	89,63	100,00	100,87	59,49
Zj-Soll (min RSB)	150,00	0,00	100,00	0,00	0,00
Zj-Soll (max RSB)	150,00	160,00	100,00	125,00	60,00

Bild 14: Ergebnismatrix mit unterschiedlichen Standardfällen innerhalb einer Matrix

Qi-ist	Qi-Soll (min)	Qi-Soll (max)
3,95	50,00	50,00
3,60	100,00	100,00
3,87	50,00	50,00
3,78	100,00	100,00
3,53	200,00	200,00

18,73

Qi-ist	Qi-Soll (min)	Qi-Soll (max)
50,00	50,00	50,00
100,00	100,00	100,00
50,00	50,00	50,00
100,00	100,00	100,00
200,00	200,00	200,00

500,00

Qi-ist	Qi-Soll (min)	Qi-Soll (max)
3,95	50,00	50,00
3,60	100,00	100,00
3,87	50,00	50,00
3,78	100,00	100,00
3,53	200,00	200,00

18,73

Qi-ist	Qi-Soll (min)	Qi-Soll (max)
50,00	50,00	50,00
100,00	100,00	100,00
50,00	50,00	50,00
100,00	100,00	100,00
200,00	200,00	200,00

500,00

Qi-ist	Qi-Soll (min)	Qi-Soll (max)
25,00	25,00	25,00
125,00	125,00	125,00
175,00	175,00	175,00
100,00	100,00	100,00
75,00	75,00	75,00

500,00

lich aus x_i (vgl. Fixpunktgleichung (19)), welches dann wiederum nur von der „Entfernung“ Z_j zu \bar{Z}_j abhängig ist – würde die Obergrenze Z_j^{\max} überschreiten, wird fz_j so berechnet, dass $\sum_i v_{ij} = Z_j^{\max}$ und gleichzeitig von x_i beeinflusst („Entfernung“ Z_j zu \bar{Z}_j).

Innerhalb dieser Iterationsverfahren ist speziell auf die Fixpunktgleichung (19) zu verweisen, in welcher der Faktor \bar{Z}_j den Endpunkt der Attraktivitätsabnahme eines Zieles darstellt. Das bedeutet, die Elastizität „wirkt“ um so mehr, je näher sich das in der Zielwahl berechnete Z_j an dem vorgegebenen \bar{Z}_j befindet. Die Wirkungsstärke ist natürlich parameterabhängig (Parameter α). Bezüglich des Parameters lässt sich folgende Aussage treffen: Läuft der Parameter α gegen Null, wird die Auswirkung der auslastungsabhängigen Attraktivität immer geringer. (Mit der i. d. R. genutzten Festlegung $\bar{Z}_j = Z_j^{\max}$ entsteht für $\alpha = 0$ die Berechnung der Verkehrsströme ohne auslastungsabhängige Attraktivität).

$$x_j(p) = e^{-\frac{\alpha}{\alpha+1}} \cdot \left(\frac{\bar{Z}_j}{\sum_i B_{ij} \cdot f_{q_i}(p+1)} \right)^{\frac{\alpha}{\alpha+1}} \quad (19)$$

Eine ausführliche Beschreibung der verschiedenen MULTI- und FURNESS-Lösungsverfahren findet sich in Schiller (vgl. [9] S. 59 ff).

3 Beispielmodellierung auslastungsabhängiger Attraktivitäten

Wiederum in Bezug auf Beispiel 2 vom Anfang des Artikels, lassen sich sehr gut die Unterschiede in der Berechnung aufzeigen. Im folgenden Beispiel 3 wird das Modell mit der Möglichkeit zur Abbildung auslastungsabhängiger Attraktivität genutzt (Bilder 8 bis 10).

$$v_{ij} = (B_{ij} \cdot b_j(Z_j)) f_{q_i} \cdot fz_j$$

$$Q_i^{\min} \leq Q_i = \sum_j v_{ij} \leq Q_i^{\max}, \text{ wobei } Q_i^{\min} = Q_i^{\max} \quad (20)$$

$$Z_j^{\min} \leq Z_j = \sum_i v_{ij} \leq Z_j^{\max}, \text{ wobei } Z_j^{\min} \neq Z_j^{\max}$$

Allerdings wird der in Fixpunktgleichung (19) beschriebene Parameter α Null gesetzt. Somit wirkt keine (!) auslastungsabhängige Attraktivität und das Ergebnis der Berechnung ist richtiger Weise identisch mit dem Ergebnis aus Beispiel 2 (Bilder 8 bis 10).

Setzt man nun in einem Beispiel 4 den Parameter zur Quantifizierung der auslastungsabhängigen Attraktivität α auf 0,1, sind deutlich die Unterschiede zu erkennen (Bilder 11 bis 13).

Das Zielverkehrsaufkommen in Verkehrszelle 2 wird durch die auslastungsabhängige Attraktivität deutlich beeinflusst. Da die Verkehrszelle 2 in Beispiel 3 vollkommen ausgelastet war, was auf die sehr gute Lagegunst zurückzuführen ist, wirken jetzt die zusätzlichen Aufwände am Ziel und lassen diese Zelle unattraktiver erscheinen. Da keine anderen Zellen an die maximale Kapazität reichen, werden dafür diese Ziele in Abhängigkeit ihrer Aufnahmefähigkeit und ihrer Lagegunst entsprechend gewählt.

Generiert man den Fall, dass genau so viele Zielgelegenheiten wie quellseitige Ortsveränderungen existieren, füllt das Verfahren alle Ziele bis zum maximal möglichen Verkehrsaufkommen aus, da der Quellverkehr verteilt werden muss, egal ob sehr hohe Bedien- oder Wartezeiten existieren. Gleichzeitig ist an den Ergebnissen von Beispiel 3 und Beispiel 4 zu erkennen, dass die Berechnung der Zielwahl ohne auslastungsabhängige Attraktivität eigentlich nur ein Sonderfall der Berechnung mit auslastungsabhängiger Attraktivität ist. Dieser Sonderfall wird (wie gezeigt) durch den Parameter zur Quantifizierung der auslastungsabhängigen Attraktivität hervorgerufen.

4 Fazit

Der hier vorgestellte Ansatz stellt derzeit die allgemeinste Form von Zielwahlmodellen dar, da er innerhalb eines einzigen Berechnungsansatzes durch die Verwendung von minimalen und maximalen Randsummenbedingungen alle relevanten räumlichen Restriktionen abbilden kann. So ist die Abbildung des einfachen quellseitig fixierten Logitmodells von Anfang

$$v_{ij} = \frac{e^{-\beta \cdot A_{ij} + \ln(Z_j)}}{\sum_j e^{-\beta \cdot A_{ij} + \ln(Z_j)}} \cdot Q_i \Rightarrow$$

$$v_{ij} = e^{-\beta \cdot A_{ij} + \ln(Z_j^{\max})} \cdot f_{q_i} \cdot f_{z_j} \quad (21)$$

$$Q_i^{\min} = Q_i = \sum_j v_{ij} = Q_i^{\max}$$

$$0 = Z_j^{\min} \leq Z_j^* = \sum_i v_{ij} \leq Z_j^{\max} = \infty$$

⁶ Hier soll noch angemerkt werden, dass bei der Betrachtung auslastungsabhängiger Attraktivitäten in makroskopischen Zielwahlmodellen mit Absicht nicht auf die Unterscheidung Wegekettenmodelle vs. Modelle, welche mit einzelnen Quelle-Ziel-Relationen arbeiten, eingegangen wurde. Der hier beschriebene Ansatz kann in beide Theoriekomplexe implementiert werden.

genau so möglich, wie die produktions- und/oder attraktionsseitige Verwendung unterschiedlicher Standardfälle – im Sinne von unelastischen und elastischen Randsummenbedingungen – innerhalb einer Nachfrageschicht⁶ und somit innerhalb einer Matrix (vgl. im Bild 14 speziell die Zielverkehrsaufkommen). Eine weitere Verbesserung ist, dass dabei stets der selbe modelltheoretische Ansatz und Lösungsalgorithmus verwendet wird.

Darüber hinaus können auch zum ersten Mal auslastungsabhängige Attraktivitäten modelliert werden. Dies stellt sowohl eine weitere Verbesserung des Theoriegebildes als auch der praktischen Anwendbarkeit dar. Die zugehörigen Lösungsalgorithmen iterieren zügig und stabil. Ebenso kann die hier gezeigte Methode auf drei oder n Dimensionen linearer Gleichungssysteme erweitert werden (z.B. zur simultanen Ziel- und Verkehrsmittelwahl). Dem Verkehrsplaner wird damit ein Modellierungswerkzeug zur Verfügung gestellt, welches ihm ermöglicht, bei strategischen Verkehrsplanungen noch besser auf die Gegebenheiten des Verkehrsgeschehens einzugehen.

Literaturverzeichnis

- 1 Bregman, L.M. (1967): Ein Beweis der Konvergenz des Verfahrens von G.W. Sheleikovsky für ein Transportproblem mit Beschränkungen, S. 147-156, In Shurnal vycisl. mat. i mat. fiz. Heft 7/1967
- 2 Kirchhoff, P. (1970): Verkehrsverteilung mit Hilfe eines Systems bilinearer Gleichungen. Ein Beitrag zur Entwicklung von Verkehrsmodellen, Dissertation TU Braunschweig, Braunschweig
- 3 Lohse, D. (1997): Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung, Band 2: Verkehrsplanung, 2. Auflage, Berlin, Verlag für Bauwesen GmbH
- 4 Lohse, D.; Schiller, C.; Teichert, H. (2006): Das Verkehrsnachfragemodell EVA – Simultane Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung und Verkehrsaufteilung. In Straßenverkehrstechnik Heft 4/2006, S. 181-192, Kirschbaum Verlag, Bonn
- 5 Lohse, D.; Teichert, H.; Dugge, B.; Bachner, G. (1997): Ermittlung von Verkehrsströmen mit n-linearen Gleichungssystemen – Verkehrsnachfragemodellierung, S. 16-153, Schriftenreihe Heft 5, Dresden, Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr der TU Dresden
- 6 Ortúzar, J. DE D.; Willumsen, L.G. (2004): Modeling Transport, 3. Auflage, Chichester u. a. O., John Wiley & Sons Inc.
- 7 Schiller, C. (2004): Integration des ruhenden Verkehrs in die Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodellierung. Schriftenreihe Heft 8, Dresden, Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr der TU Dresden
- 8 Schiller, C. (2006): Gekoppelte Verkehrsnachfragemodelle – Ein grundlegendes Modell. In Straßenverkehrstechnik Heft 7/2006, Kirschbaum Verlag, Bonn
- 9 Schiller, C. (2007): Erweiterung der Verkehrsnachfragemodellierung um Aspekte der Raum- und Infrastrukturplanung. Schriftenreihe Heft 10, Dresden, Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr der TU Dresden

Befestigungen für Verkehrszeichen



CARL TURCK

Carl Turck GmbH & Co.KG Telefon 0 23 53 / 90 94-0
 Löhbach 1 • 58553 Halver Telefax 0 23 53 / 90 94 69
 E-Mail: info@carl-turck.de www.carl-turck.de

seit 1845